

DOI: 10.3969/j.issn.1673-6141.2019.03.007

基于粒子偏振特性的雾霾区分算法研究

吴时超^{1,2}, 麻金继^{1,2}, 章群英^{1,2}, 余海啸^{1,2}, 安源^{1,2}

(1 安徽师范大学地理与旅游学院, 安徽 芜湖 241003;

2 资源环境与地理信息工程安徽省工程技术研究中心, 安徽 芜湖 241003)

摘要: 雾、霾粒子的组成成分不同, 雾滴具有大粒子特性, 霾的成分复杂, 小粒子居多。偏振观测对小粒子具有很强的敏感性, 基于该特性利用矢量辐射传输模型 (Vector linearized discrete ordinate radiative transfer, VLIDORT) 计算雾粒子和霾粒子的偏振辐射特性, 模拟结果经公式计算可得到雾、霾粒子的偏振反射率。模拟结果表明: 在散射角 $125^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 范围内, 雾粒子和霾粒子的偏振反射率随散射角分布有明显不同的变化趋势。利用该偏振辐射特性结合雾霾粒子的辐射特性, 基于 2008 年 3 月 11 日的多角度偏振成像观测的卫星载荷 (Polarization and directionality of the earth's reflectances, POLDER) 数据对雾和霾进行区分。将区分结果与中分辨率成像光谱仪 (Moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS) 图像及地面站观测资料进行对比, 验证了算法的有效性。这对高分五号大气气溶胶多角度偏振探测仪 (Directional polarimetric camera, DPC) 遥感数据的应用具有重要的参考价值和科学意义。

关键词: 大气光学; 雾霾粒子; 矢量辐射传输; 区分算法

中图分类号: TP79

文献标识码: A

文章编号: 1673-6141(2019)03-0221-07

Research on Haze and Fog Distinguishing Algorithm Based on Particle Polarization Characteristics

WU Shichao^{1,2}, MA Jinji^{1,2*}, ZHANG Qunying^{1,2}, YU Haixiao^{1,2}, AN Yuan^{1,2}

(1 College of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241003, China;

2 Engineering Technology Research Center of Resources Environment and Geographic Information System of Anhui Province, Wuhu 241003, China)

Abstract: The compositions of fog and haze particles are different. The droplets have the characteristics of large particles, while the composition of haze is complex, and small particles are mostly present. Polarization observation has very great sensitivity to small particles. Based on this characteristic, the polarized radiation characteristics of fog and haze particles are calculated using the vector linearized discrete ordinate radiative transfer (VLIDORT) model. The simulation results can be used to obtain the polarization reflectance of fog

基金项目: Supported by National Natural Science foundation of China(国家自然科学基金项目, 41271377)

作者简介: 吴时超 (1994 -), 男, 江苏省句容人, 研究生, 主要从事大气光学遥感研究。

E-mail: shichaowu@ahnu.edu.cn

导师简介: 麻金继 (1975 -), 男, 安徽省当涂人, 从事遥感, GIS 及其基于 3S 技术的大气环境参量等研究。

E-mail: jinjima@ahnu.edu.cn

收稿日期: 2018-03-15; **修改日期:** 2018-03-26

and haze particles. In the range of scattering angles of 125° to 150° , the polarization reflectance of fog and haze particles varies significantly with the scattering angle distribution. By taking advantage of the radiation characteristics of fog and haze particles, fog and haze have been distinguished based on the polarization and directionality of the earth's reflectances(POLDER)data on March 11, 2008. The distinguished results were compared with moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) images and ground station observation data to verify the effectiveness of the algorithm. It is believed that the algorithm has great reference value and scientific significance for China's GF-5 of directional polarimetric camera(DPC) remote sensing data.

Key words: atmospheric optics; haze particles; vector radiation transmission; distinguishing algorithm

1 引言

雾和霾在一定区域内影响能见度的天气现象,对交通、健康等方面具有一定的危害性。近年来,随着某些区域环境问题的不断恶化,雾霾一直受到广泛关注^[1]。雾主要由悬浮在空气中的小水滴组成,霾由大量极其细微的干尘粒子组成,成分较为复杂。目前,国际上对雾霾的监测与识别主要分为地基与空基两大类。在地面观测^[2]中,多采用人工目测的方式进行记录,雾的能见度小于 1 km,呈灰白色;霾的水平能见度小于 10 km,多呈黄色、红色等。在空基观测中,主要利用卫星遥感来进行识别。葛魏等^[3]通过利用 MODIS 数据中对霾粒子敏感的光谱通道来统计霾的反射率与亮温,从而识别灰霾。刘勇洪^[4]基于美国国家海洋和大气管理局(National oceanic and atmospheric administration, NOAA)/甚高分辨率扫描辐射计(Advanced very high resolution radiometer, AVHRR)卫星资料建立颜色指标和光谱指标对霾进行识别。在这些方法中,地基观测虽然具有较高的精度,但观测范围小,成本较高。利用卫星遥感检测的方法虽然增大了监测范围,但只用到雾、霾的辐射强度,没有考虑雾、霾粒子的偏振特性,并且观测基于单一方向,不能精确地反演雾和霾的参量。偏振观测对于小粒子非常敏感,利用这一特性,基于 POLDER 数据结合雾、霾粒子的辐射和偏振辐射特性构建了雾霾区分算法。

2 数据与原理

2.1 数据

2.1.1 POLDER 影像

POLDER 由法国空间局法国国家太空研究中心(Centre national d'Etudes spatiales, CNES)研制,搭载在日本 ADEOS 卫星上,具有多光谱多角度偏振特性,可以从多达 14 个角度对同一目标进行观测。其含有 9 个波段,从可见光到近红外,其中多角度偏振成像观测的卫星载荷(Polarization & anisotropy of reflectances for atmospheric sciences coupled with observations from a lidar, PARASOL)传感器有 3 个偏振波段,分别为 490、670 和 865 nm。

2.1.2 雾、霾粒子的谱分布与复折射指数

从地面长期观测结果^[5-7]可以发现,在发生灰霾污染时,水溶型粒子占灰霾光学厚度的主要部分,其中同时还含有黑炭型和亚微米型粒子。利用矢量辐射传输模型 VLIDORT 中的线性散射代码和 T-matrix 矩阵从这 4 种不同粒子群的物理性质计算其消光系数、散射系数、散射相函数、偏振相函数等光学性质以考察多角度偏振信号对雾霾的敏感性。三种霾粒子的物理性质从气溶胶与云光学特性库云与气溶胶光学特性库(Optical properties of aerosols and clouds, OPAC)^[8]中获取,雾粒子则采用李学斌^[9]利用光学粒子计数器对雾的实际测量结果中得出雾粒子物理参数(见表 1)。谱分布函数采用对数正态谱分布的形式

$$n(r) = \frac{C}{r\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln r - \ln r_m)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (1)$$

式中 C 是归一化粒子数常数, σ 是标准偏差, r_m 是平均半径。

表 1 865 nm 波段雾、霾粒子物理性质

Table 1 Physical properties of fog and haze particles at 865 nm

	Real part	Image part	Mean radius	Standard deviations
FOG	1.33	4.86E-07	0.55	0.65
BC	1.75	-0.43	0.01	0.69
WASO	1.43	-0.01	0.03	0.81
SubM	1.33	0.00	0.44	0.4

注: FOG 为雾粒子, BC 为黑碳型粒子, WASO 为水溶型粒子, SubM 为亚微米细粒子, Real part 和 Image part 分别为复折射指数的实部和虚部

2.2 VLIDORT

VLIDORT 模型^[10]是由美国 RT Solutions, Inc 的 Spurr 开发的矢量辐射传输软件包, 模型采用离散纵坐标法求解辐射传输方程。辐射传输过程主要涉及到地表、大气分子、云与气溶胶粒子和信号接收等部分。VLIDORT 是最近发展的线性矢量离散坐标法辐射传输模型, 可以同时计算 4 个 Stokes 矢量 $[I, Q, U, V]$ 。VLIDORT 的输入条件主要包括基本的光学特性输入, 额外的大气参数输入, 地表特性输入。

利用多角度遥感偏振数据进行雾和霾参数探测的一个核心环节是矢量辐射传输方程的模拟计算。利用 VLIDORT 矢量辐射传输方程进行偏振数值的计算。采用归一化偏振辐射强度^[11-12]表示卫星接收的偏振信息。大气顶层卫星接收到归一化辐射强度和归一化偏振辐射强度分别为

$$L = \frac{\pi I}{E_s}, \quad (2)$$

$$L_p = \frac{\pi \sqrt{Q^2 + U^2}}{E_s}, \quad (3)$$

式中, I 为光的总强度, Q 为平行或垂直于参考平面的线偏振的强度, U 为与参考平面成 45° 角上的线偏振的强度, $\sqrt{Q^2 + U^2}$ 为大气层顶的偏振辐射强度, E_s 为大气层顶的太阳辐射通量密度。

3 方 法

3.1 偏振特性

3.1.1 地表类型对偏振反射率的影响

在利用 VLIDORT 模型模拟雾霾粒子的偏振特性中, 使用双向偏振辐射分布函数 (Bidirectional polarized reflectance distribution function, BPDF) 模拟地表偏振辐射。BPDF2009 模型使用归一化植被指数 (Normalized difference vegetation index, NDVI) 进行拟合。因此, 通过改变 NDVI 值来改变地表类型, 在雾、霾粒子群的几何平均半径和光学厚度不变的条件下, 考虑不同地表类型对雾、霾粒子偏振反射率的影响。使用 VLIDORT 模型计算时, 几何平均半径参见表 1, 光学厚度设置为 1, 霾粒子选择水溶型粒子进行模拟。分别设置 NDVI 值为 -0.5 、 0 、 0.35 和 0.5 , 得到的 Stokes 参量利用 (3) 式可计算得到雾、霾粒子的偏振反射率。雾、霾粒子的偏振特性都是模拟的 865 nm 处, Stokes 值取大气层顶向上。模拟结果如图 1 所示。

从图 1 中可知, 当气溶胶光学厚度较大时, 通过改变 NDVI 值来改变地表类型时, 地表类型的变化对雾、霾粒子的偏振反射率影响非常小, 偏振反射率的数值大小基本上不随着地表类型的改变而受到影响, 由此可知, 偏振探测对地表不敏感, 这是利用偏振观测来区分雾霾的一大优势。

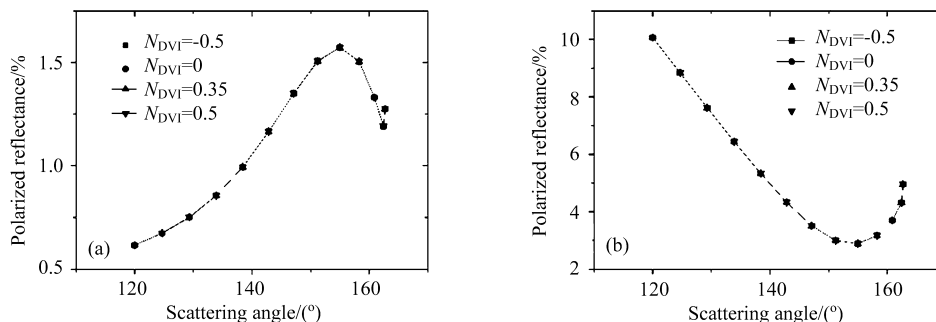


图 1 雾霾粒子不同地表类型下偏振反射率随散射角的分布图。(a) 雾; (b) 霾

Fig.1 Distribution of polarized reflectance with scattering angle for different types of surface. (a) Fog; (b) haze

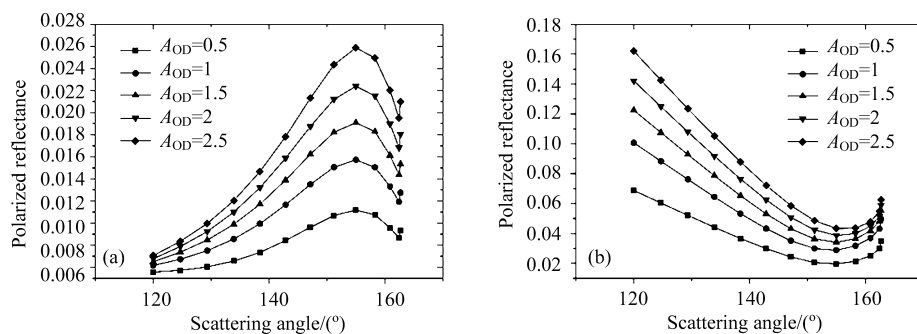


图 2 雾霾粒子不同气溶胶光学厚度下偏振反射率随散射角的分布。(a) 雾; (b) 霾

Fig.2 Distribution of polarization reflectivity with scattering angle at different aerosol optical thicknesses of fog and haze particles. (a) Fog; (b) haze

3.1.2 气溶胶光学厚度对偏振反射率的影响

在雾、霾粒子群的几何平均半径和地表类型恒定的条件下, 只考虑不同气溶胶光学厚度对雾、霾粒子偏振反射率的影响。几何平均半径参见表 1, 地表 NDVI 值设为 0.35。雾和霾的光学厚度分别设为 0.5、1、1.5、2 和 2.5。其他条件与 3.1.1 节相同, 模拟结果如图 2 所示。

由图 2 中的偏振反射率多角度分布可知, 随着光学厚度的增大, 雾霾粒子的偏振反射率也随之增大。雾、霾粒子偏振反射率对光学厚度的敏感性不同, 在模拟的散射角范围内, 雾粒子偏振反射率对气溶胶光学厚度的敏感性随着散射角的增大而增大, 在散射角 155° 附近时对光学厚度的敏感性最强; 霾粒子偏振反射率对气溶胶光学厚度的敏感性随着散射角的增大而减弱, 散射角 155° 附近时的敏感性最强。雾、霾粒子偏振反射率随散射角变化的趋势不受光学厚度改变的影响。

3.2 雾霾区分算法

利用 VLIDORT 矢量辐射传输模型, 模拟雾、霾粒子的多角度偏振特性。由 3.1 节可知, 地表类型和气溶胶光学厚度对雾、霾粒子的偏振反射率变化趋势没有影响。在对 POLDER 数据进行大量统计之后, 选择雾霾频繁发生的华北平原作为研究区域, 设置太阳天顶角为 60° , 观测天顶角范围取 $0\sim 75^\circ$, 步长为 5° , 相对方位角设为 20° 。霾粒子分别模拟了霾污染时常见的黑碳型粒子、水溶型粒子和亚微米细粒子。粒子的物理性质见表 1, 模拟结果使用 (3) 式计算出雾、霾粒子的偏振反射率。经过大量的模拟统计, 得到模拟结果如图 3 所示。

从图 1 中很明显地看出, 三种霾粒子 865 nm 处的偏振反射率在散射角 $120^{\circ} \sim 160^{\circ}$ 范围内, 都随着散射角的增大而减小。而雾粒子在 865 nm 处的偏振反射率在该散射角范围内呈现出先增大后减小的趋势。由于雾的组成与水云相似, 所以雾也有类似于水云的虹效应现象, 表现在散射角 150° 左右时, 偏振反射率有一个极大值。因此, 雾粒子和霾粒子在散射角 $125^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 之间偏振反射率随散射角的变化趋势有很大的不同, 将散射角范围内的偏振反射率进行拟合, 得到其变化趋势的斜率。基于这一特性, 结合雾霾粒子的辐射强度具有一定的值域范围^[4], 选择雾霾发生频繁的华北平原作为研究区域, 通过对大量 POLDER 数据进行统计, 结合地面站观测资料, 得到区分雾、霾粒子的阈值条件。在散射角 $125^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 范围内, 雾的反

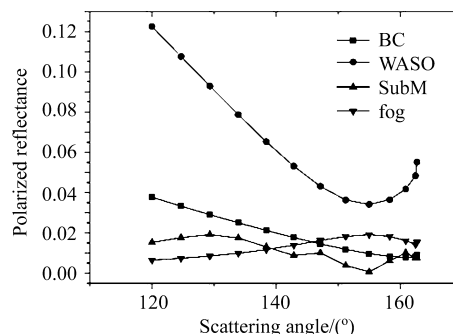


图 3 雾、霾粒子 865 nm 波段偏振反射率随散射角的分布

Fig.3 Distribution of polarization reflectance with scattering angle at 865 nm for fog and haze particles

射率随散射角的变化趋势有很大的不同, 将散射角范围内的偏振反射率进行拟合, 得到其变化趋势的斜率。基于这一特性, 结合雾霾粒子的辐射强度具有一定的值域范围^[4], 选择雾霾发生频繁的华北平原作为研究区域, 通过对大量 POLDER 数据进行统计, 结合地面站观测资料, 得到区分雾、霾粒子的阈值条件。在散射角 $125^{\circ} \sim 150^{\circ}$ 范围内, 雾的反

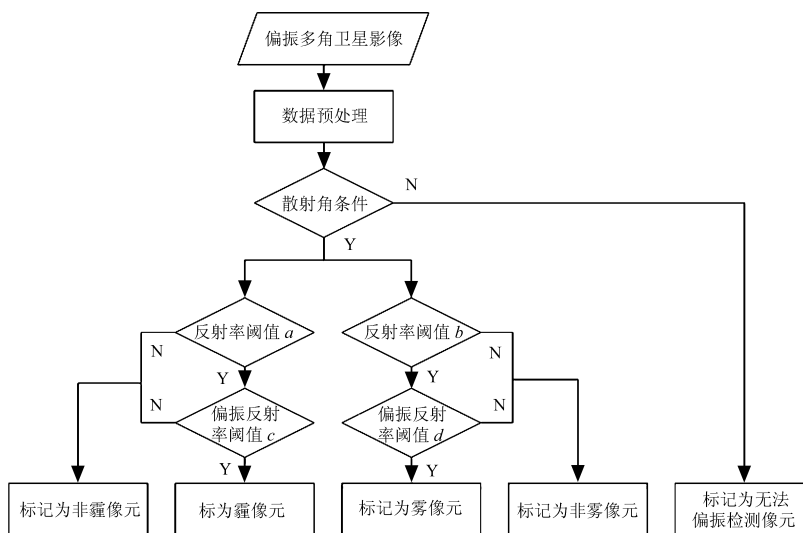


图 4 POLDER 数据雾霾偏振区分算法流程图

Fig.4 Flow chart of fog and haze polarization discrimination algorithm based on POLDER data

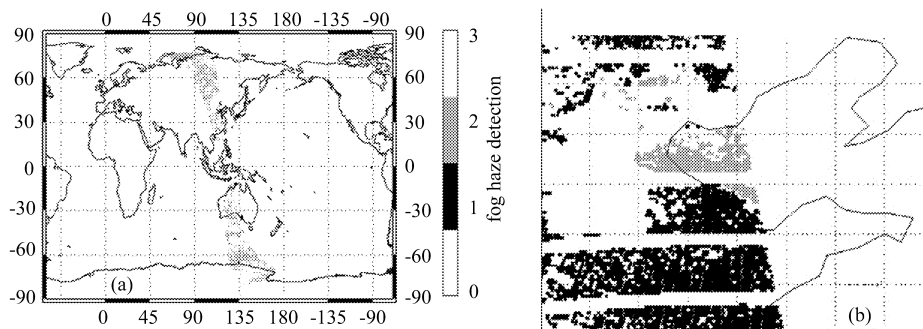


图 5 2008 年 3 月 11 日 Parosol 数据雾霾区分结果 (a) 整轨数据雾霾识别结果; (b) 华北平原部分区域雾霾识别结果

Fig.5 Parosol data haze classification results on March 11, 2008 (a) haze identification results of the whole rail data;(b) haze identification results of parts of north China plain

射率取值 0.4~0.75, 偏振反射率斜率取值 $-0.08 \sim -0.05$; 霾的反射率取 0.15~0.35, 偏振反射率斜率取值大于 -0.05 。

4 应用

2008 年 3 月 11 日华北平原发生了大范围的雾和霾。河北省及山东省大部分区域、河南省北部发生了灰霾天气; 渤海上空受大雾笼罩。基于粒子偏振特性区分算法对过境 POLDER 数据进行检测, 检测结果如图 5 所示。

图 5 中, 0 表示非雾、霾粒子, 1 表示检测为霾粒子, 2 表示检测为雾粒子, 3 表示未经偏振检测的不确定粒子。将算法检测结果与 2008 年 3 月 11 日的 MODIS 真彩色合成图 (见图 6) 结合地面观测资料对比可以发现, 检测结果较为理想, 山东省东北部灰霾检测结果与验证数据相吻合, 渤海上空检测的雾粒子也与对比数据相吻合。研究区域的雾、霾覆盖区域都被较完整的识别出来。渤海湾西北部一些薄云与碎云被检测为雾, 这是由于雾与云的组成类似, 性质具有相似性, 该算法对于雾和薄云、碎云的区分精度不高。阈值的设定存在改进空间, 散射角条件的限制导致样本具有区域性和随机性; 进行霾粒子模拟时, 只考虑单种灰霾粒子存在的情况, 没有考虑两种及多种灰霾粒子混合的情况, 算法具有一定的局限性。

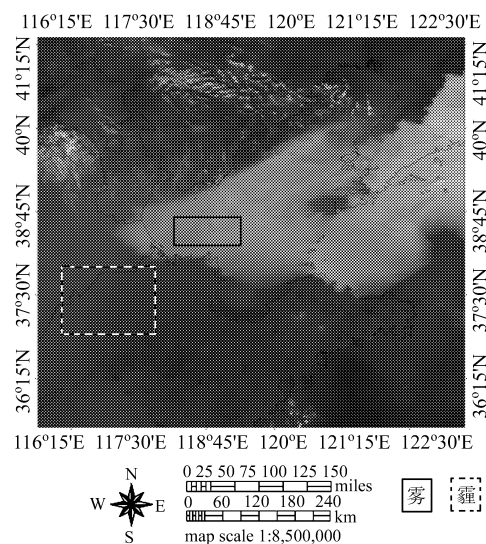


图 6 2008 年 3 月 11 日 MODIS 数据真彩色合成图
Fig.6 True color synthesis of MODIS data on March 11, 2008

5 结论

利用矢量辐射传输模型对雾、霾粒子多角度偏振辐射特性进行模拟, 利用雾、霾粒子偏振辐射特性, 结合其辐射特性, 得到了基于 POLDER 数据的雾、霾区分算法。该算法可以很好地识别出雾和霾的覆盖区域, 证明偏振观测可以用于雾和霾的区分识别, 并对即将上天的高分 5 号卫星携带的 DPC 传感器具有重要的参考价值 and 科学意义。为利用高分数据来区分雾、霾奠定了理论基础。

该偏振区分算法可以在一定程度上区分雾霾, 但区分精度上有上升的空间, 下一步计划考虑多种灰霾粒子混合下的多模态霾粒子偏振辐射特性, 以及各种不同形式产生的雾, 进而增加阈值条件, 提高偏振遥感区分雾霾算法的精度。

参考文献:

- [1] Li Fang, Lü Daren. Features of aerosol optical depth with visibility grade over Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(20): 3413-3419(in Chinese).
李放, 吕达仁. 北京能见度等级下气溶胶光学厚度特征 [J]. *大气环境*, 1997, **31**(20): 3413-3419.
- [2] China Meteorological Administration. *Specification for Surface Meteorological Observations* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005.

- 中国气象局. 地面气象观测规范 [M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [3] Ge Wei, Chen Liangfu, Si Yidan, *et al.* Haze spectral characteristics analysis and satellite remote sensing recognition algorithm [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, **36**(12): 3817-3824(in Chinese).
葛巍, 陈良富, 司一丹, 等. 霾光谱特性分析与卫星遥感识别算法 [J]. 光谱学与光谱分析, 2016, **36**(12): 3817-3824.
- [4] Liu Yonghong. Research on radon recognition in Beijing based on NOAA/AVHRR satellite data [J]. *Meteorological*, 2014, **40**(5): 619-627(in Chinese).
刘勇洪. 基于 NOAA/AVHRR 卫星资料的北京地区霾识别研究 [J]. 气象, 2014, **40**(5): 619-627.
- [5] Wei Peng, Li Zhengqiang, Wang Yan, *et al.* Remote sensing estimation of aerosol composition and radiative effects in haze days [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2013, **17**(4): 1021-1031(in Chinese).
魏鹏, 李正强, 王堰, 等. 灰霾污染状况下气溶胶组分及辐射效应的遥感估算 [J]. 遥感学报, 2013, **17**(4): 1021-1031.
- [6] Li Zhengqiang, Gu Xingfa, Wang Ling, *et al.* Aerosol physical and chemical properties retrieved from ground-based remote sensing measurements during heavy haze days in Beijing winter [J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2013, **13**(2): 10171-10183.
李正强, 顾行发, 王玲, 等. 北京冬季严重灰霾期间基于地面烟感测量反演气溶胶物理和化学性质 [J]. 大气化学与物理, 2013, **13**(2): 10171-10183.
- [7] Wang Ling, Li Zhengqiang, Li Donghui, *et al.* Inversion of dust content in atmospheric aerosol based on the spectral characteristics of refractive index measured by remote sensing [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(6): 1644-1649(in Chinese).
王玲, 李正强, 李东辉, 等. 基于遥感观测的折射指数光谱特性反演大气气溶胶中沙尘组分含量 [J]. 光谱学与光谱分析, 2012, **32**(6): 1644-1649.
- [8] Hess M, Koepke P, Schult I. Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, **79**(5): 831-844.
- [9] Li Xuebin, Gong Chunwen, Li Chao, *et al.* Droplet spectral distribution and fog-infrared attenuation [J]. *Laser and infrared*, 2009, **39**(7): 742-745(in Chinese).
李学彬, 宫纯文, 李超, 等. 雾滴谱分布和雾对红外的衰减 [J]. 激光与红外, 2009, **39**(7): 742-745.
- [10] Spurr R. LIDORT and VLIDORT: Linearized Pseudo-Spherical Scalar and Vector Discrete Ordinate Radiative Transfer Models for Use in Remote Sensing Retrieval Problems[C]// *Light Scattering Reviews 3*[M]. Springer Berlin Heidelberg, 2008:229-275.
- [11] Cheng Tianhai, Gu Xingfa, Chen Liangfu, *et al.* Research on multi-angle polarization characteristics of cirrus clouds [J]. *Journal of Physics*, 2008, **57**(8): 5323-5332(in Chinese).
程天海, 顾行发, 陈良富, 等. 卷云多角度偏振特性研究 [J]. 物理学报, 2008, **57**(8): 5323-5332.
- [12] Liu Zhigang, Zhou Guanhua. Polarization of sun glint [J]. *Journal of Infrared & Millimeter Waves*, 2007, **26**(5): 362-365(in Chinese).
刘志刚, 周冠华. 太阳耀光的偏振分析 [J]. 红外与毫米波学报, 2007, **26**(5): 362-365.